

LA REALIZZAZIONE DI UN MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (DTM) PER IL TERRITORIO ALPINO LOMBARDO

Bruno Testa (*), Barbara Aldighieri (*)

(*) Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (I.D.P.A.) Sezione di Milano, via Mangiagalli 34 – Milano.

INTRODUZIONE

Nell'ambito del programma di zonazione del rischio idrogeologico nelle aree più critiche del territorio regionale (previsto dalla L.267/1998 e della L.183/89) è stato pianificato dalla Struttura Rischi Idrogeologici della R.L. l'inventario di dettaglio, alla scala 1:10000, dei dissesti per l'intero territorio montuoso regionale esteso circa 10000 kmq (Fig.1), avente come cartografia di riferimento la Carta Tecnica Regionale.

Allo scopo di applicare modelli di rischio allo scenario alpino regionale, si è ritenuto necessario progettare un modello digitale del terreno a maglia di 20x20m partendo dalla CTR, tenendo in considerazione sia la ridondanza di informazione dell'equidistanza ogni 10m in area montuosa che la sua realizzazione in tempi utili. A tal fine è stata stipulata una convenzione tra l'Istituto Regionale di Ricerca della Lombardia e il C.N.R. con l'obiettivo di ottenere un DTM di qualità più elevata possibile, stante gli inevitabili errori insiti nella rappresentazione cartografica della CTR. La presente relazione vuole fornire un quadro dei criteri adottati per la realizzazione di tale DTM, dei criteri qualitativi e quantitativi di valutazione nonché l'illustrazione dei risultati ottenuti attraverso una breve analisi e una loro comparazione con prodotti analoghi realizzati con altre scelte progettuali.

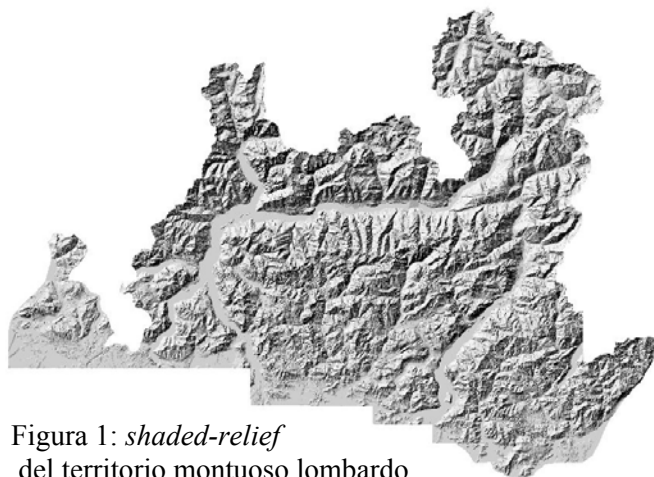


Figura 1: *shaded-relief*
del territorio montuoso lombardo

REALIZZAZIONE DELLA BASE DATI VETTORIALE

La procedura più comune per l'acquisizione dei dati da documenti cartografici richiede la digitalizzazione e la vettorizzazione delle isoipse, la loro codifica con operazioni interattive o semi-automatiche. La realizzazione della fase di acquisizione ha richiesto circa 48 mesi/uomo, con l'utilizzo di software specifici di vettorizzazione interattiva (Tracer - Hitachi) e di altri 12 mesi uomo per l'editing, l'assemblaggio delle sezioni CTR e il controllo di congruenza della base dati vettoriale (Arc/Info 8.2 - ESRI). Per la preparazione della base dati vettoriale erano già disponibili: a) i files raster delle sezioni della C.T.R. 1:10.000, b) i files vettoriali di parte delle curve di livello (CL_CTR), c) i punti quotati (PQ_CTR).

a) - La Carta Tecnica Regionale, come ogni prodotto cartografico tradizionale, è finalizzata alla visualizzazione delle forme del territorio e talvolta presenta distorsioni nel disegno che possono creare difficoltà nel processo di vettorizzazione, come ad esempio scarpate compresse e creste smussate dalla rappresentazione prospettica, errori mascherati con soluzioni grafiche, errori di disegno al margine di sezioni contigue, ecc. Nonostante gli errori insiti nel documento cartografico di partenza, questo costituisce il modello analogico del territorio da considerare come il riferimento reale da riprodurre in forma digitale in quanto base tecnica per tutte le informazioni tematiche ad esso correlate.

b) - Lo strato CL_CTR contiene i vettori di tutte le curve di livello ogni 50m e 100m (direttrici), interrotte ad ogni attraversamento con altri elementi cartografici, assenti solo nelle aree a tratteggio arti-

stico; i vettori delle curve di livello ordinarie (modulo 30m e 80m) e ausiliarie (modulo 10m, 20m, 40m, 60m, 70m, 90m) compaiono sporadicamente e segmentati.

Tenendo conto che qualsiasi algoritmo di interpolazione incontra difficoltà inversamente proporzionali alla omogeneità nella distribuzione spaziale delle informazioni e alla loro continuità laterale, nella progettazione di un DTM basato sull'informazione grafica delle CTR si è ritenuto indispensabile completare le direttrici congiungendone i tratti interrotti e interpretandole nelle aree a tratteggio artistico, in conformità con i punti quotati esistenti. Altre due curve ordinarie (modulo 30m e 80m) sono state tracciate quasi del tutto ex novo e in modo continuo, garantendo sull'intera area l'equidistanza delle isoipse ogni 20 o 30m; tutte le altre curve ausiliarie (moduli 10m, 20m, 40m, 60m, 70m, 90m) sono state tracciate nelle aree pianeggianti, di fondovalle e comunque a basso gradiente altimetrico, oppure dove rivelano una morfologia non descrivibile con le sole curve ordinarie; ovviamente, a differenza delle precedenti, queste hanno carattere di discontinuità.

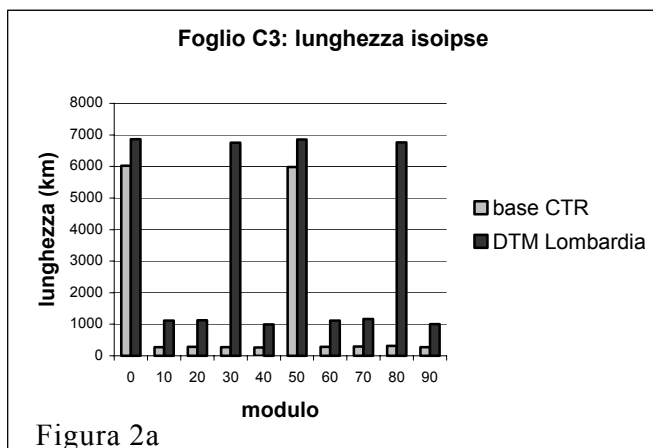


Figura 2a

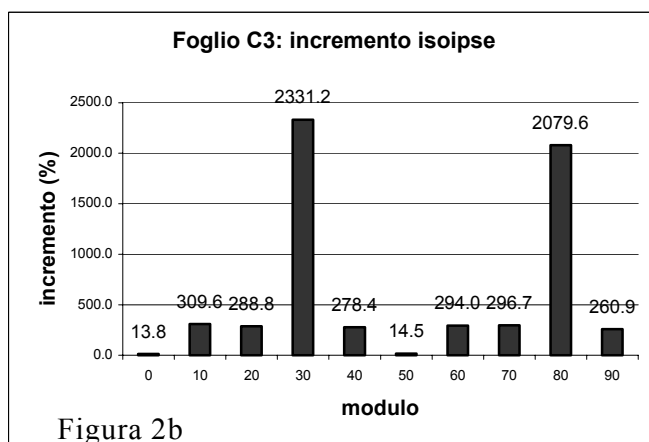


Figura 2b

A titolo di esempio, si riportano i grafici relativi alla lunghezza complessiva e alla percentuale di incremento di isoipse utilizzate per la realizzazione del DTM nell'area del Foglio C3, (Fig. 2a, 2b) ubicato in corrispondenza della porzione centrale della Valtellina, nel quale sono state affrontate tutte le problematiche connesse all'ampio fondovalle dell'Adda, alle morfologie irregolari e alle basse acclività.

Si nota il minimo incremento (13,8% e 14,5%) delle curve di livello di modulo 0 e 50, nonostante sia di circa un migliaio di chilometri, e il notevole infittimento (oltre 2000%) apportato alle isoipse di modulo 30 e 80, quasi del tutto assenti nella base dati vettoriale CTR di partenza; l'istogramma evidenzia inoltre come la morfologia a bassa acclività (Tab. 1, classe 0°-15°) presente nell'area abbia richiesto l'incremento di circa 300% delle isoipse ausiliarie. Complessivamente, nel Foglio C3, è stato necessario incrementare di oltre il 100% i presistenti 14278 km di isoipse, ottenendo una lunghezza finale complessiva di circa 33750km.

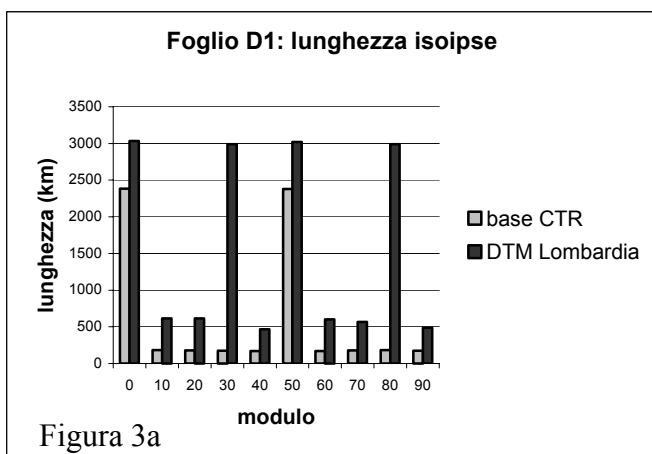


Figura 3a

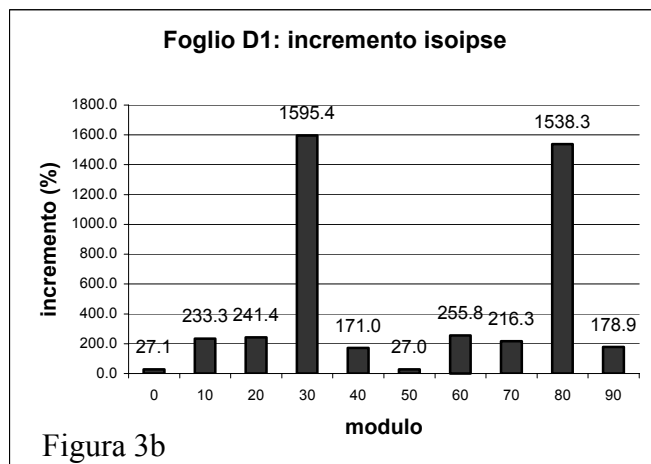


Figura 3b

Il Foglio D1, alta Valtellina, costituisce invece un buon campione di area completamente montuosa, con alte vette rocciose ad elevata acclività (Tab. 1, classe >40°), rappresentate sulla CTR con tratteggio artistico. Anche qui (fig. 3a, 3b) l'incremento delle isoipse a modulo 0 e 50 è piuttosto basso (27%), ma doppio rispetto al Foglio C3 per la presenza delle aree rocciose; le curve di livello di modulo 30 e 80 sono state quasi tutte tracciate ex-novo, mentre in media la percentuale delle curve ausiliarie aggiunte risulta inferiore a quella del Foglio C3, data la minore estensione delle aree a bassa acclività (16%) e morfologicamente irregolari (tab.1). La lunghezza finale delle isoipse risulta comunque raddoppiata rispetto della base dati iniziale.

Tali osservazioni possono ragionevolmente essere estese all'intera area del DTM.

Classe di acclività (°)	Foglio C3		Foglio D1	
	Area (km2)	Area (%)	Area (km2)	Area (%)
0 -15	328	32,8	80	16
15 - 40	601	60,1	352	70,4
> 40	71	7,1	68	13,6

Tabella 1 : distribuzione dell'acclività nei fogli CTR C3 e D1

c) - Accanto al lavoro di infittimento delle curve di livello particolare attenzione ha richiesto l'analisi dei punti quotati esistenti, contenuti nello strato PQ_CTR: sono stati selezionati ed eliminati dal set di generazione del DTM, quelli riferiti a manufatti (ponti, rilevati stradali, edifici, ecc.) che appartengono all'infrastruttura abitativa e genererebbero errori di quota al suolo superiori ai margini di progetto. Tra i punti eliminati, complessivamente circa il 5% del totale, una piccola percentuale corrisponde a punti palesemente errati appartenenti realmente alla morfologia del terreno, dei quali non è stato possibile ricostruire univocamente la quota o la posizione esatta.

INTERPOLAZIONE DEL DTM

Nella cartografia tradizionale, la quota è rilevabile solamente in corrispondenza dell'elemento lineare dell'isoipsa; per definizione invece, un modello digitale del terreno è un'insieme di dati che permette l'interpolazione di un punto arbitrario di terreno con una data precisione. In pratica si tratta di una griglia numerica destinata a fornire l'andamento delle quote in ciascun punto del terreno.

Tutti i modelli dei dati altimetrici sono riconducibili a due strutture fondamentali:

- 1) a griglia (raster): agilmente elaborabili e facilmente integrabili con altre tipologie di dati tramite operazioni matriciali; presentano però anisotropia dell'informazione altimetrica secondo le otto direzioni spaziali della griglia.
- 2) a triangoli irregolari (TIN): offrono la possibilità di incorporare nel modello altimetrico informazioni ausiliarie (impluvi, displuvi, discontinuità morfologiche, ecc.).

Per la scelta dell'algoritmo di interpolazione dei vettori in una superficie continua di tipo raster è stata effettuata un'analisi comparata di tre metodi differenti sia in ambiente Arc/Info che MGE.

La scelta è ricaduta sull'interpolatore implementato nel GIS MGE (Intergraph): l'algoritmo produce inizialmente un TIN a partire dalle curve di livello secondo la triangolazione di Delaunay, successivamente il modulo inserisce nel modello i punti quotati appartenenti a linee di impluvio e displuvio, generate automaticamente, e ricalcola l'intero TIN in base anche a tali informazioni aggiuntive.

In seguito il modello a triangoli viene convertito in griglia di punti con passo di campionamento di 20m attraverso algoritmi comportanti operazioni di semplice interpolazione bilineare, i valori sono di tipo floating, con due cifre decimali.

VALIDAZIONE DEL DTM

Tutta la fase di validazione del DTM raster è stata svolta in stretta collaborazione con il Dott. Alberto Carrara, ricercatore del CNR-CSITE di Bologna, il quale ha inoltre definito e tradotto in un algoritmo

in linguaggio AML (Arc/Info Macro Language) la procedura di calcolo dell'indice di qualità delle curve di livello generate dal DTM rispetto a quelle originali.

Per la validazione del DTM è stato effettuato in modo reiterativo un controllo qualitativo della realistica della morfologia riprodotta dal DEM e dell'assenza di artefatti (Carrara e alii., 1997), nonché un controllo quantitativo dell'indice di qualità (Carrara, 2001) secondo i seguenti criteri:

- in corrispondenza delle curve di livello originali i valori del DTM devono coincidere (o discostarsi di un valore inferiore al 5% dell'equidistanza) con la quota delle medesime;
- nello spazio compreso tra ogni coppia di isoipse i valori del DTM devono quantomeno ricadere nell'intervallo altimetrico definito dalla coppia;
- sempre nello spazio di cui sopra, i valori del DTM devono variare linearmente tra le quote della coppia;
- in aree a bassa informazione altimetrica, quali ampie spianate vallive o dossi estesi, i valori del DTM devono riflettere in modo verosimile la probabile conformazione morfologica delle medesime;
- distribuzioni di quote del DTM che definiscono conformazioni morfologiche irrealistiche (artefatti) devono essere limitate a meno dello 0.1 – 0.2% dei dati.

Le prime due condizioni si basano sull'assunzione che il DTM derivato dalle isoipse digitali originali, dovrà riprodurle con sufficiente accuratezza a meno dell'incertezza spaziale dovuta alla dimensione della cella del raster (20x20m). Viene quindi calcolato un *indice di qualità* basato sulla costruzione di un *buffer* intorno alle isoipse originali (solo per le 30m, 50m, 80m, 100m) di ampiezza pari alla dimensione della cella del raster (20m), che rappresenta lo scostamento massimo accettato tra le curve originali (generatrici del DTM) e quelle calcolate (generate dal DTM). I vettori rigenerati dovrebbero ricadere entro l'area di buffer, se sono esterni ad essa la tagliano e creano dei poligoni di errore. La sommatoria di tutti i poligoni di errore e la sua normalizzazione tramite divisione per l'area totale di buffer, dovrebbe essere contenuta sotto la soglia del 5%.

I controlli effettuati su aree test hanno fornito valori di errore inferiori all'1%. Con questi margini, dovrebbe ritenersi plausibile un errore di interpolazione in altezza compreso tra 5m e 10m rispetto alle quote fissate dalla struttura vettoriale della base dati CTR.

Il criterio che la distribuzione delle quote interpolate tra coppie di isoipse sia lineare è senz'altro molto conservativo e talora errato se riferito all'andamento reale dei versanti, tuttavia solo la presenza di informazione aggiuntiva (punti quotati o isoipse ausiliarie) può giustificare una non linearità dell'interpolazione.

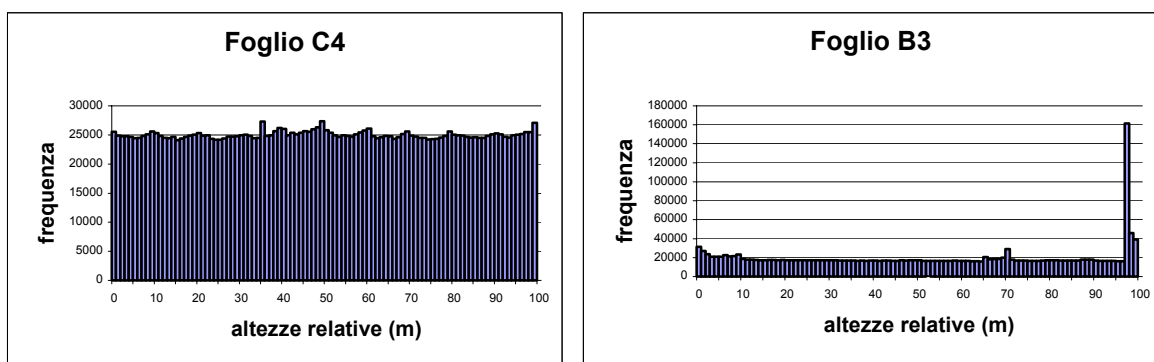


Figura 4a e 4b: distribuzione di frequenza delle altezze relative alle curve di livello dei 100m.

I diagrammi di Fig. 4 mostrano come la distribuzione di frequenza tenda ad essere di tipo *rettangolare*, salvo per le aree a quota realmente costante come ad esempio nel Foglio B3 la presenza del Lago di Como e della sua piana attorno a quota 200m s.l.m.

La quarta condizione, difficilmente quantificabile, è verificabile solo dall'osservatore esperto confrontando una conformazione altimetrica con un'ipotesi di assetto morfologico.

L'ultima condizione è apparentemente la più semplice da verificare, anche se piccoli artefatti possono essere individuati solo con soluzioni grafiche o statistiche applicate in modo reiterativo durante le numerose fasi di generazione del DTM.

Per l'interpolazione, il controllo, la validazione dell'intera area sono stati necessari circa 12 mesi/uomo, di cui 2 mesi/uomo per la supervisione e il coordinamento del progetto.

CONFRONTO CON IL DTM - CGR

Il DTM, ricampionato su una maglia di 40m di lato, è stato messo a confronto con quello fornito dalle "Compagnia Generale di Ripresa aeree - Ferretti", a maglia 40X40m e derivato da fotografie 1 :70 000 e da CTR, nell'area corrispondente al bacino della Valchiavenna (578kmq), dove è stata effettuata un'analisi sulla rispettiva distribuzione delle quote e delle pendenze.

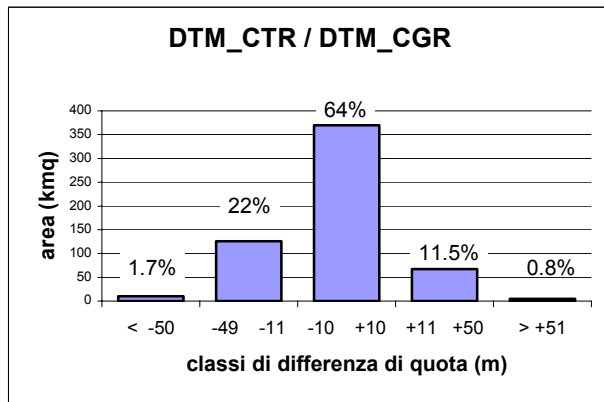


Figura 5a: analisi delle quote

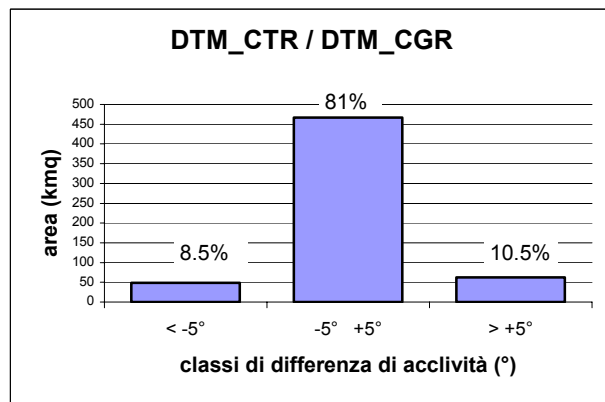


Figura 5b: analisi delle acclività

La classe centrale nella Fig.5a comprende versanti omogenei e aree di fondovalle; le classi estreme si riferiscono a situazioni locali in cui sussistono discrepanze nella interpretazione dell'assetto morfologico. Inoltre il DTM_CTR, per cause probabilmente legate alle diverse modalità di progettazione, sovrastima sistematicamente i valori di quota sui versanti S-SW e viceversa li sottostima sui versanti opposti. Per quanto riguarda le pendenze (Fig.5b), in più dell'80% dell'area i due DTM concordano; valori negativi sono presenti in aree a basso grado di acclività, dove per generare il DTM_CTR è stato necessario introdurre isoipse ausiliarie, mentre valori positivi si osservano in corrispondenza di situazioni di alta acclività, dove il tratteggio artistico della cartografia CTR tende a esagerare la forte pendenza.

CONCLUSIONI

Con riferimento alle specifiche tecniche indicate nel documento d'intesa Stato-Regioni per l'elaborazione di un database topografico, il DTM prodotto con i criteri sopra indicati, si posizionerebbe a livello intermedio tra medio-alto e alto, degenerando a livello più basso in quelle aree a tratteggio artistico, dove i vettori originali, interpretando il graficismo, vengono ricostruiti già con margini di errore medio-alto.

Inoltre l'apparente sovrastima delle pendenze in aree a elevato gradiente altimetrico (forre, valli incise, scarpate, ecc.), si ripercuote sulla valutazione delle condizioni di rischio che, se basate unicamente su criteri legati all'acclività dei versanti, può portare a considerazioni di tipo cautelativo.

BIBLIOGRAFIA

CARRARA, A., BITELLI, G. e CARLÀ, R., 1997, Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines, *Int. J. Geographical Information Science*, vol.11, no.5, 451- 473.